

# 陕南山区斜坡孕灾地质环境条件分析

## ——以汉阴县漩渦镇为例

周修波, 李永红, 何意平, 张辉, 孙遥, 蒙晓, 丁子昂

(陕西省地质环境监测总站, 西安 710054)

**摘要:** 为了支撑城镇国土空间规划, 避免将地质灾害高易发区作为城镇发展方向, 选取地质灾害高发频发的汉阴县漩渦镇为研究范例, 开展大比例尺、精细化斜坡孕灾地质环境条件调查。选取斜坡的地形地貌(地貌、坡面形态、剖面形态、坡高、坡度、坡向)、地质构造、工程地质岩组(岩体坚硬程度、岩体完整程度、覆盖层类型、覆盖层厚度)、斜坡结构、地表水、地下水、人类工程活动(切坡建房、切坡修路、斜坡开垦)等7大类17项孕灾因子, 采用多元逻辑回归分析与地质灾害发育的关系。结果表明, 斜坡坡面形态、剖面形态、坡度、岩体坚硬程度、岩体完整程度、覆盖层厚度、地表水、切坡建房与切坡修路、斜坡开垦等9项因子对山区斜坡地质灾害发育有明显的控制作用, 以9项关键因子建立地质灾害易发性评价模型可提高易发性区划的准确度。

**关键词:** 斜坡孕灾地质环境条件; 孕灾因子; 多元逻辑回归分析

**中图分类号:** P694; P56; X4 **文献标识码:** A

## ANALYSIS OF GEOLOGICAL HAZARD ENVIRONMENTAL CONDITIONS OF SLOPE IN SOUTHERN SHAANXI MOUNTAINOUS AREAS

### ——TAKING XUANWU TOWN, HANYIN COUNTY AS AN EXAMPLE

ZHOU Xiu-bo, LI Yong-hong, HE Yi-ping, ZHANG Hui, SUN Yao, MENG Xiao, DING Zi-ang

(Shanxi Institute of Geo-Environment Monitoring, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In order to support the spatial planning of urban land and avoid taking the highly prone area of geological disasters as the development direction, the Xuanwu Town, Hanyin County, which is prone to geological disasters, is selected as the research example to carry out large-scale and refined geological environmental conditions of slope disasters. Select the landform (landform units, surface shape, profile shape, height, gradient, aspect), tectonics, engineering geology (rock strength, rock integrity, overburden types, overburden thickness), slope structure, river, groundwater, human engineering activities (such as building houses, building roads, and cultivating) classified into 7 categories, 17 factors, to analyze the relationship between geological hazard development and geological hazard in multiple logistic regression analysis. The results show that slope surface shape, profile shape, gradient, rock strength, rock integrity, building houses and roads on slopes, slope cultivation are believed to have a significant control effect on the development of slope geological hazards. Establishing a geological hazard susceptibility evaluation model based on nine key factors can improve the

accuracy of susceptibility zoning.

**Key words:** geological hazard environmental conditions of slope; geological hazard factors; multiple logistic regression analysis

斜坡是滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害孕育的最基本单元<sup>[1]</sup>,而地质灾害的发生是斜坡地质环境本质因素与降雨、地震等诱发因素共同作用的结果<sup>[2]</sup>。开展斜坡孕灾环境条件研究,是提高地质灾害易发性区划精度的先决条件,是国土空间规划的制定和优化基础依据。随着 GIS 技术和数据处理技术的发展,层次分析法、证据加权分析法、神经网络模型法、模糊综合评判法、信息量模型法<sup>[3]</sup>等在分析孕灾地质环境条件方面取得了长足进展。陈晓利等<sup>[4]</sup>基于确定性系数法,开展了龙陵地震诱发滑坡的影响因子分析;陈绪钰等<sup>[5]</sup>基于信息量法定量分析四川峨眉山市各孕灾因子对地质灾害发育的影响;吴森<sup>[6]</sup>等采用贡献率权重法,通过统计已发生滑坡对选取各评价因子的贡献率,对研究区滑坡灾害影响因子进行分析。但以往的研究忽略了影响因子间相关性,不利于评价各因子自对地质灾害易发性的贡献率大小。逻辑回归是研究二分类因变量常用的多元统计分析方法,在地质灾害领域最早用于编制地质灾害区划图<sup>[7]</sup>。在逻辑回归中,因变量是灾害是否发生,自变量是控制灾害发生的影响因子,用线性回归来描述地质灾害发生的复杂非线性关系,可以揭示因变量和多个自变量之间的多元回归关系<sup>[8]</sup>,检验孕灾因子间相关性,确定各因子权重<sup>[9]</sup>。陶舒等<sup>[10]</sup>运用逻辑回归模型对汶川县北部地区次生滑坡灾害敏感性进行了评价;谭龙等<sup>[11]</sup>运用二元逻辑回归模型对白龙江流域滑坡的孕灾因子敏感性进行了分析。评价模型准确率较高,但分析主要基于栅格单元,形状规则的评价单元往往不能反映实际情况,导致模型误差增大。

本文以汉阴县漩渦镇地质灾害调查为实例,以斜坡为评价单元,定性分析地质灾害孕灾环境条件,定量研究各孕灾因子的权重,可以为陕南山区城镇精细化地质灾害调查和孕灾地质条件分析提供新思路。

## 1 研究区背景

研究区地处陕南秦巴山区中部,为“两山夹一川”地形,境内最高点位于北部凤凰山主峰铁瓦殿,海拔 2 128 m,最低点位于汉江出境处,海拔 310 m,汉江自西向东从漩渦镇中部流过。研究区地处秦岭

复合造山带与扬子板块衔接部位,北部凤凰山变质杂核岩岩性以火山相变质岩、火山碎屑岩为主,南部汉王城叠覆岩片为大规模逆冲推覆构造形成的构造岩片,发育剪切面理、多级韧性剪切带、褶皱等变形构造,岩性以片岩、板岩为主。

研究区经过 2013 年汉阴县地质灾害详细调查(1:50 000)、2021 年汉阴县地质灾害风险调查(1:50 000)、2022 年漩渦镇地质灾害风险调查(1:10 000),递进式摸清地质灾害底数。通过本轮精细化野外调查,查清研究区地质灾害隐患点、历史灾情点、地质环境问题点等各类地质灾害点共计 145 处,作为分析统计样本。其中滑坡 127 处(中型 10 处,小型 117 处),占地质灾害总数 87.59%;崩塌 11 处(均为小型),占地质灾害总数 7.59%;泥石流 7 处(中型 1 处,小型 6 处),占地质灾害总数 4.83%。

## 2 斜坡单元划分

目前常采用 GIS 的地表水文分析和人机交互划分斜坡单元。通过 GIS 正反地形生成无洼地 DEM、提取水流流向、计算汇流量、生成河网和集水流域,山谷线和山脊线分割基本单元<sup>[12]</sup>。再经过人为剔除地势平坦、地质灾害不发育地区,根据行政边界、人口分布、地质条件,优化、合并地质环境相似、地貌类型相近的斜坡单元。为了确保评价精度,斜坡单元大小一般控制在 0.05~0.3 km<sup>2</sup>。漩渦镇版图面积 224.97 km<sup>2</sup>,剔除河流阶地、山麓冲洪积扇等平地缓坡区,共划分斜坡单元 993 处,总面积 220.17 km<sup>2</sup>(图 1)。

## 3 孕灾地质环境条件分析

地质灾害的发育取决于孕灾地质环境条件,其发生是各种内外应力因素综合作用的结果。通常与地质灾害形成发育密切相关的地质环境条件包括:地形地貌、地质构造、工程地质岩组、斜坡结构、地表水、地下水、人类工程活动等。

### 3.1 地形地貌与地质灾害

#### 3.1.1 地貌与地质灾害

研究区宏观地貌单元可分为北部凤凰山高中山区、中北部低山丘陵区、中部汉江河谷区、南部低山



图 1 研究区斜坡单元划分

区 4 类。其中汉江河谷阶地区、低山丘陵区斜坡单元地质灾害发育比例较高,南部低山区次之,北部高山区发育比例最低(图 2a)。

综合分析认为,凤凰山高中山峡谷山高坡陡,地形切割强烈,是最有利于地质灾害发育的地貌,但由于该区人类工程活动弱,且以火山岩等硬质岩为主,地质灾害发育比例和灾害点密度均较低。低山丘陵区位于凤凰山南坡余脉至汉江一带,相对高差小于 300 m,山势低缓,坡度多在  $10^{\circ}\sim 35^{\circ}$ ,人类工程活动最为强烈,地质灾害发育比例和灾害点密度最高。南部低山区地形切割较为强烈,微地貌形态以凸形脊梁、“V”形沟谷为主,人类工程活动较为强烈,地质灾害发育比例和灾害点密度较高。中部汉江河谷阶地地势相对平缓,坡脚汉江冲刷强烈,汉江岸坡地质灾害发育比例较高。

### 3.1.2 斜坡坡面形态与地质灾害

研究区斜坡坡面形态主要反映斜坡单元微地貌形态,划分为 4 个基本类型,即凸形坡、凹形坡、直线形坡、复合形坡。

统计显示凹形坡地质灾害发育比例最高,直线形坡、凸形坡次之,复合形的斜坡最为发育,但地质灾害发育比例最低(图 2b)。

综合分析认为,复合形斜坡冲沟发育,坡面被切割成齿状,坡面覆盖层被坡面汇水、冲沟流水冲刷,难以存留,且人类工程相对较弱,地质灾害发育程度轻。直线形坡面较为平直,以坡面汇水为主,覆盖层厚度均匀,建房、修路等人类工程活动切坡形成临空面,容易诱发地质灾害。凸形斜坡梁顶一般较开阔

平缓,耕种、建房等人类工程活动集中,坡面汇水及地下水通过坡体两侧冲沟及时排出,地质灾害发育程度较轻。凹形坡多呈圆椅状,斜坡后缘及两侧覆盖层随坡面汇水堆积于中部缓坡,一般厚度较大,雨季地下水埋深较浅,坡脚受冲刷或切坡极易诱发地质灾害。

### 3.1.3 斜坡剖面形态与地质灾害

研究区斜坡剖面形态划分为凸型、凹型、直线型、折线型和阶梯形 5 个类型。统计显示凹形、折线形、阶梯型等负向型斜坡地质灾害发育比例较高,凸型次之,直线型坡最低。

综合分析认为,凸型斜坡在长期地质营力作用下趋于稳定,难以发生整体性失稳,但滑坡、崩塌等地质灾害往往位于斜坡的局部,剖面形态呈凸型数量占比较高(崩塌剖面均为凸型)。直线型斜坡也属于正向类斜坡,往往由于切坡等人类工程活动,形成前缘临空面,诱发滑坡等地质灾害。负向类凹型、折线型和阶梯型斜坡,覆盖层上薄下厚,上陡下缓地形有利于降雨入渗,前缘受流水冲刷或不合理切坡时,极易诱发地质灾害(图 2c)。

### 3.1.4 斜坡坡度与地质灾害

坡度表示地表在该处的倾斜程度,在地质灾害的发生中起着重要作用。将研究区斜坡平均坡度划分为  $<10^{\circ}$ 、 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 、 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 、 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 、 $>45^{\circ}$  共 5 个区间。平均坡度在  $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$  的斜坡单元分布最为广泛,地质灾害也最为发育, $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 、 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$  斜坡单元中地质灾害较为发育。斜坡坡度  $>45^{\circ}$  和  $<10^{\circ}$  的斜坡单元,地质灾害发育程度较低(图 2d)。

综合分析认为, $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$  斜坡单元是最有利于覆盖层堆积的坡度区间,覆盖层结构较松散、厚度变化大,且坡体耕种、切坡修路、建房等人类工程活动最为强烈,人工诱发浅表层堆积层滑坡十分发育。 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$  斜坡单元覆盖层厚度相对较小,岩质滑坡发育。 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$  斜坡单元坡度较缓,局部切坡形成陡坎,易诱发滑坡灾害。 $>45^{\circ}$  的斜坡,地势陡峻,最有利于崩塌发育。 $<10^{\circ}$  的斜坡,地质灾害不发育。

### 3.1.5 斜坡坡高与地质灾害

研究区地质灾害在各个斜坡高度区间内均匀分布,数量占比  $10.77\%\sim 15.11\%$  之间(图 2e)。坡高虽然没有改变斜坡内应力的分布状态,随着坡高的增大,坡面汇水面积增大,对地质灾害的发育和破坏方式有一定影响。

### 3.1.6 斜坡坡向与地质灾害

坡向是影响斜坡体物理力学性质的一个重要因子。坡向不同,斜坡体所受的水热条件也会有所不

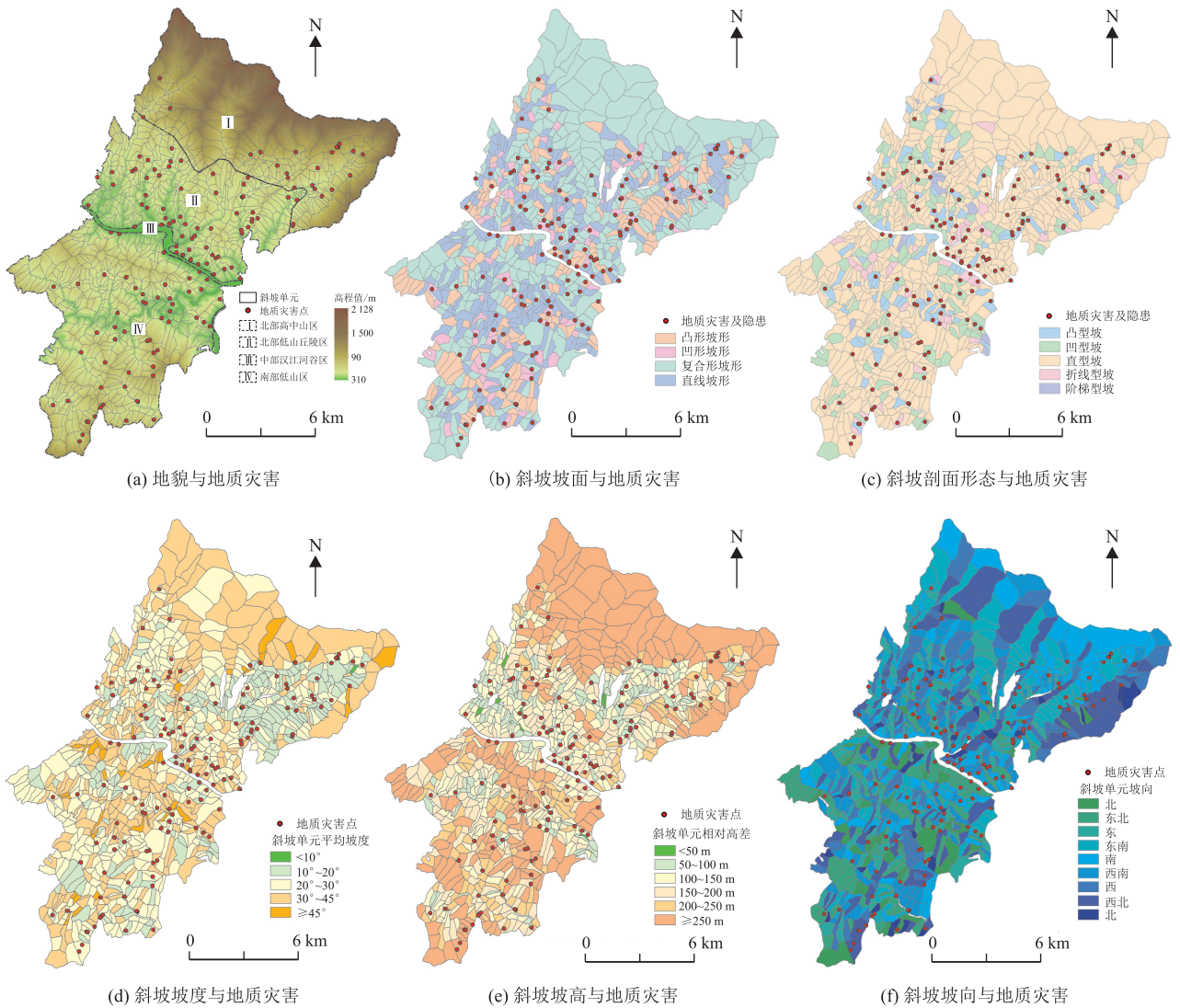


图2 地形地貌与地质灾害

同,可能造成不同坡向的坡体物理力学性质有所差异。将研究区斜坡坡向划分为北、东北、东、东南、南、西南、西、西北 8 个坡向带。

研究区地质灾害在各个坡向区间内均有分布,数量占比 9.20%~15.83%之间(图 2f),斜坡坡向仅仅影响水热条件,对地质灾害发育控制作用不明显。

### 3.2 地质构造与地质灾害

地质构造一方面造成了山高坡陡、沟宽谷深的地形地貌,为地质灾害的形成提供了有利的地貌条件;另一方面构造带内由于强烈构造作用,岩体破碎、裂隙发育、地下水发育,为地质灾害的形成提供了物质条件。

研究区位于南秦岭造山带南部逆冲推覆构造带,安康-紫阳-平利次级推覆构造带内,断裂及褶皱极为发育,变质作用强烈,构造线紧密成束,呈北西-

南东向展布。规模较大的断裂构造有堰坪断裂、汉王城断裂等。褶皱构造为上七里复向斜,核部位于研究区南部上七村一带(图 3)。

根据调查情况,将地质构造影响程度分为极严重影响(斜坡位于断裂破碎带或褶皱核部)、严重影响(断层破碎带宽度相对较小或斜坡位于褶皱核部两侧或次级褶皱核部)、一般影响(断裂构造从斜坡边界或从坡顶、坡脚等位置穿过,或斜坡位于褶皱两翼)、轻微影响(斜坡整体位于区域性地质构造内) 4 类。

构造对斜坡影响越严重,地质灾害发育比例也越高,这是由于断层破碎带及褶皱核部岩体破碎、裂隙发育、富水条件好、风化强烈,斜坡稳定性差。一般影响、轻微影响地段一般位于断裂构造上下盘或褶皱构造两翼,在斜坡单元表现为单斜构造,较软岩一般岩体较破碎,裂隙较发育,稳定性较差,在顺向

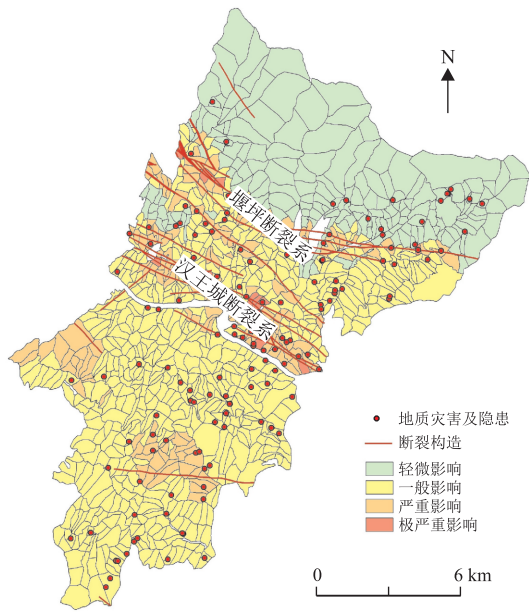


图 3 地质构造与地质灾害分布图

坡中,地质灾害较为发育,坚硬岩石一般岩体较完整,稳定性较好,地质灾害一般不发育。

### 3.3 工程地质岩组与地质灾害

岩土体是地质灾害发育的物质基础,地质灾害的发育程度与岩体强度及抗风化的能力、完整程度及结构面的抗剪性能、覆盖层类型及层厚等密切相关。

#### 3.3.1 岩体坚硬程度与地质灾害

研究区岩体坚硬程度划分为坚硬岩(石英闪长岩等)、较坚硬岩(绿泥钠长片岩等)、较坚硬-较软岩(炭硅质板岩、长石石英砂岩等)、较软岩-软岩(炭硅质片岩、粉砂质粘板岩等)4类。将 25 处岩质滑坡、11 处岩质崩塌,共 36 处地质灾害点进行统计分析(图 4a)。

研究区较软岩大面积分布,地质灾害也最为发育,坚硬、较坚硬岩斜坡,地质灾害不发育。

综合分析认为,坚硬岩、较坚硬岩层风化程度低,岩体完整,覆盖层厚度一般较薄,地质灾害不发育。较软岩、软岩抗风化能力弱,在基岩裸露区,往往形成厚度较大的风化壳,风化层间黏结力弱,极易诱发滑坡、崩塌等地质灾害。

#### 3.3.2 岩体完整程度地质灾害

研究区岩体完整程度划分为完整、较完整、较破碎、破碎 4 类。研究区较破碎、破碎变质岩广泛分布,且地质灾害发育程度较高(图 4b)。

综合分析认为,破碎、较破碎岩层构造面发育,节理裂隙面贯通性好,层间结合力差,易形成顺层面或软弱结构面滑动的岩质、岩土混合滑坡。完

整、较完整岩层完整性好,层间结合力较好,地质灾害一般不发育(如北部凤凰山主脊块状火山岩一带)。

#### 3.3.3 覆盖层类型与地质灾害

研究区内覆盖层按成因可分为崩坡积碎块石土,残坡积碎石土、粉质黏土,冲洪积漂石土、粉质黏土,局部人工填土 4 类。将 102 处土质滑坡、7 处泥石流进行统计。

研究区共划分 3 处人工填土类斜坡单元,均发育有地质灾害,地质灾害最为发育。残坡层分布最为广泛,与崩坡积层、冲洪积层地质灾害发育程度接近(图 4c)。

综合分析认为,人工填筑土采矿、修路、建房弃渣及废料堆积,结构松散,堆积厚度大,是滑坡、泥石流隐患形成的主要固体物质来源,但由于其分布面积小,形成的灾害数量少。而崩坡积层、残坡积层、冲洪积层等工程性质类似,均易形成堆积层滑坡。

#### 3.3.4 覆盖层厚度与地质灾害

研究区地处秦巴山区,覆盖层厚度整体较薄,仅山间洼地、河流阶地、山麓冲洪积扇、斜坡坡脚覆盖层较厚。斜坡覆盖层厚度按  $<1.0$  m、 $1.0\sim 2.0$  m、 $2.0\sim 4.0$  m、 $4.0\sim 8.0$  m、 $>8.0$  m 分为 5 个级别(图 4d)。

统计发现,覆盖层在  $2.0\sim 4.0$  m 区间内,堆积层滑坡最为发育,超过一半斜坡单元发育有地质灾害,且当斜坡覆盖层厚度  $>1$  m 时,地质灾害发育比例显著提升。

综合分析认为,覆盖层厚度与地质灾害密切相关,尤其是堆积层滑坡。覆盖层厚度  $<1$  m 时,滑体物质少,难以诱发大规模滑坡、泥石流灾害。斜坡覆盖层厚度  $>1$  m 时,往往耕种强烈,斜坡被改造成阶梯状,易于降雨入渗,在土岩界面容易形成软弱滑动面,在重力作用下,堆积层便会沿软弱结构面下滑形成滑坡。

### 3.4 斜坡结构与地质灾害

斜坡结构可分为岩质斜坡、岩土复合斜坡、土质斜坡 3 大类,在上文中已分析覆盖层厚度与地质灾害的关系。根据下伏基岩岩层倾向与斜坡坡向组合关系,将研究区斜坡单元划分为顺向坡、斜向坡、横向坡、逆向坡和块状结构 5 种类型,进行统计分析。

研究区各类斜坡结构地质灾害发育比例在  $10.05\%\sim 15.79\%$  之间,以顺向坡发育比例最高(图 5)。综合分析认为,顺向坡中岩层倾向与斜坡坡向一致,软弱结构面外倾,易诱发顺层滑坡。而横向坡、斜向坡、逆斜坡、块状坡风化后多呈碎块状,容易

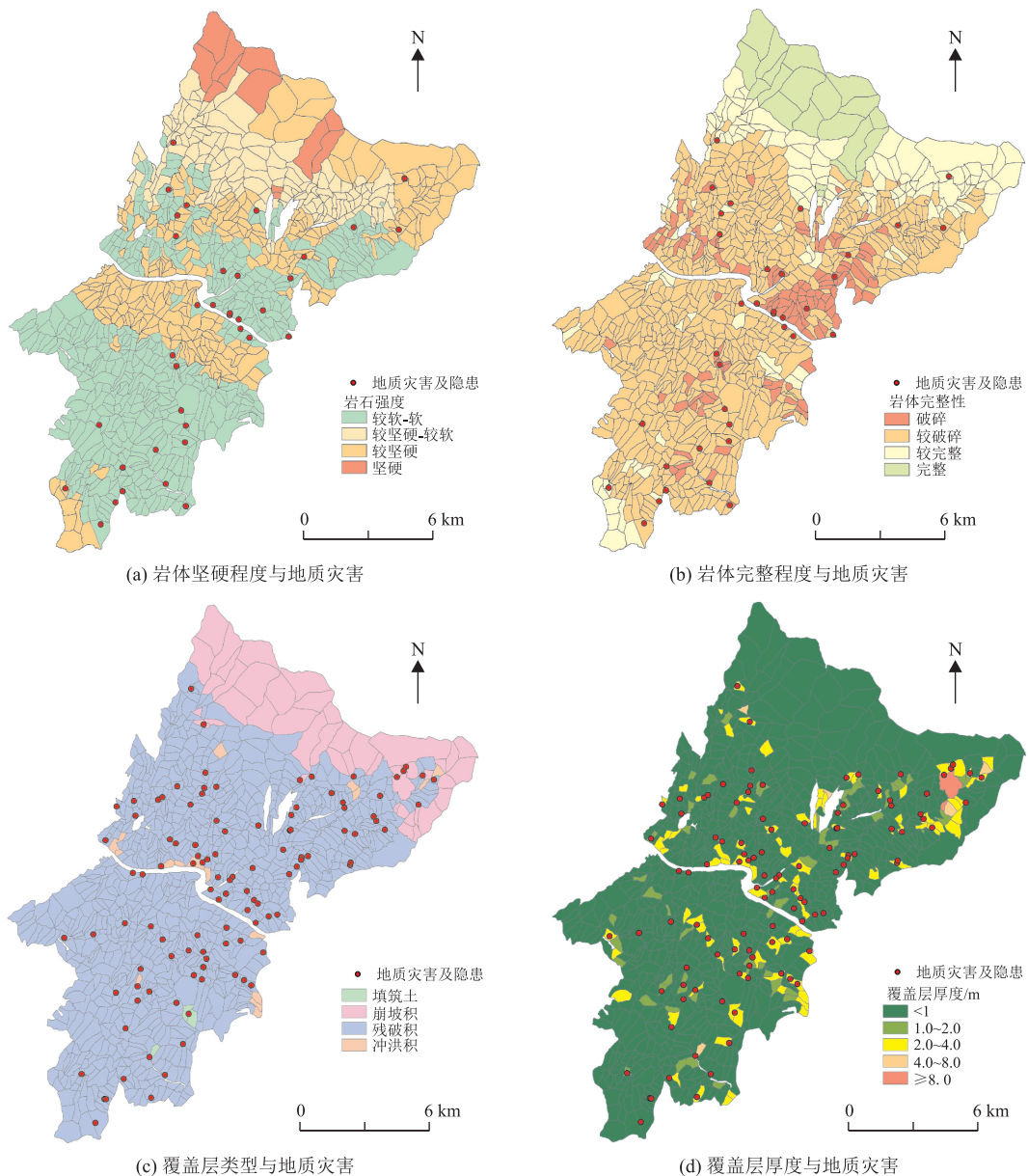


图4 工程地质岩组与地质灾害

产生沿风化界面、节理裂隙面等软弱结构面破坏的地质灾害,但由于研究区地质构造极为复杂,岩层产状变化大,斜坡结构往往是多种结构组合,对地质灾害控制作用难以界定。

### 3.5 地表水与地质灾害

地表水对地质灾害的影响主要表现在两方面:一方面不断冲刷侵蚀坡体,使岸坡下切、增高变陡,改变坡体的形态;另一方面河水不断地浸润,尤其在洪水期,水位陡降陡落,引起地下水位急剧变化,导致坡体稳定性降低,从而诱发滑坡、崩塌地质灾害(如汉江沿岸滑坡)。研究区地表水对斜坡单元影响程度按对坡脚侵蚀程度、水位变化幅度分为极严重、严重、一般、轻微、无影响5类。

统计显示汉江、木子河两岸地质灾害最为发育,凤凰山南坡河流、木子河支流两岸斜坡,地质灾害较为发育(图6)。

综合分析认为,地表水与地质灾害发育密切相关。汉江、木子河等河流不断冲刷侵蚀坡体,使岸坡下切,形成临空面,改变斜坡应力分布,易导致失稳,诱发滑坡、崩塌地质灾害。

### 3.6 地下水与地质灾害

地下水对斜坡稳定性的影响主要表现在渗透水压力、饱水加载效应和风化软化作用3个方面。降雨入渗导致地下水水量增大,动水压力增强,岩土体的自重增加,地下水长期浸润易使透水性差岩体表面软化、泥化,形成软弱结构面,斜坡易失稳破坏。

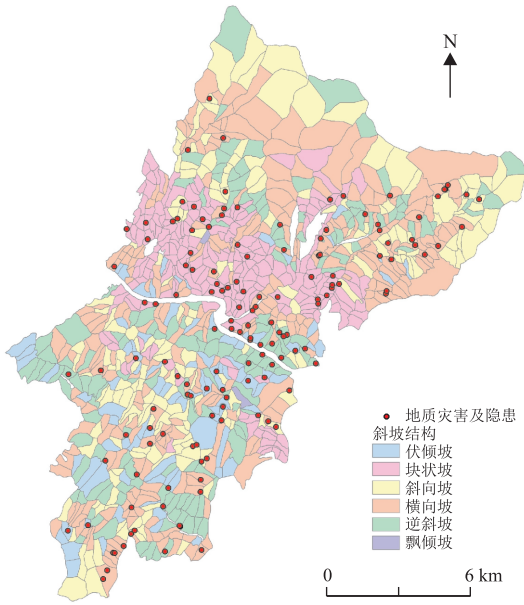


图 5 斜坡结构与地质灾害分布图

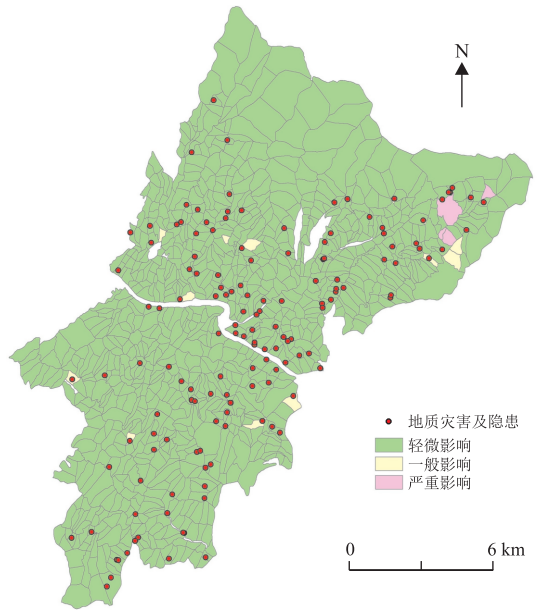


图 7 斜坡地下水与地质灾害分布图

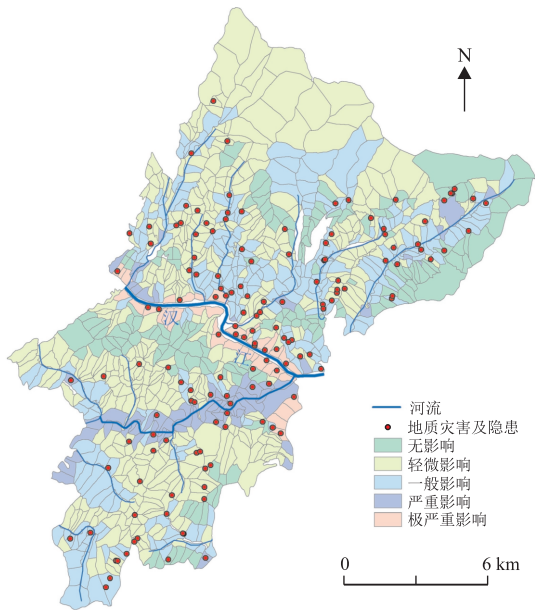


图 6 地表水与地质灾害分布图

将研究区地下水对斜坡影响程度按水位埋深、水量等分为严重、一般、轻微 3 类(图 7)。

研究区斜坡整体受地下水影响较小。地下水以基岩裂隙水为主,水量较小,主要接受大气降水入渗补给,水位随降雨和灌溉动态变化,雨季水位埋深较浅,主要控制着地质灾害发生时段。

### 3.7 人类工程活动与地质灾害

人类工程经济活动对地质灾害的影响,主要表现在切坡建房修路,破坏斜坡结构;斜坡开垦,破坏植被;采矿活动,形成高陡边坡,随意堆放弃渣形成滑坡、泥石流物源等。

#### 3.7.1 切坡建房与地质灾害

山区群众绝大多数把房屋修建在坡脚、河沟两侧、沟口处,由于建房开挖坡脚,在斜坡前端或坡面形成临空面,且修建房屋距边坡较近,往往受到滑坡、崩塌的威胁。将建房切坡按切坡高度、长度、工程防护情况分为极严重、严重、一般、轻微和无影响 5 个等级(图 8a)。

研究区 59 处地质灾害由建房切坡诱发,统计结果表明建房切坡严重地段,地质灾害发育比例明显偏高,尤其在群英村集镇、上七村集镇及行政村安置点。切坡建房开挖坡脚改变了坡体结构,导致坡体临空面增大、稳定性减弱,在降雨(风化)影响下坡脚岩土体失稳诱发上部堆积层发生滑坡。

#### 3.7.2 切坡修路与地质灾害

山区公路一般修建在坡脚或半山腰,约有 80% 的路段需开挖边坡,在重力及降雨的作用下,时常发生边坡失稳,影响过往车辆安全。将切坡修路按切坡高度、长度、工程防护情况分为极严重影响、严重影响、一般影响、轻微影响和无影响 5 个等级。将 27 处由切坡修路引起的地质灾害统计分析。

研究区切坡修路严重路段,地质灾害发育比例较高,尤其在国道 G541、汉漩公路、漩上公路、双老旅游路、大漲河旅游路沿线(图 8b)。切坡修路开挖坡脚改变了坡体结构,导致坡体临空面增大、稳定性减弱,在降雨(风化)影响下坡脚岩土体失稳,发生滑坡、崩塌。

#### 3.7.3 斜坡开垦与地质灾害

山区大量开垦坡地,一方面破坏了原有植被,加

剧了水土流失,造成地形切割强烈,斜坡变形破坏加剧。另一方面,耕种改变了斜坡形态,有利于降雨入渗。原有的直线坡形变成了阶梯状坡形,有利于地表水的入渗,同时坡体灌溉,加大了入渗补给量,不利于坡体的稳定性。将斜坡开垦按耕种面积及比例分为极严重、严重、一般、轻微和无影响 5 个等级。

研究区斜坡开垦严重地段,地质灾害发育比例显著偏高(图 8c)。斜坡耕种强烈地段一般覆盖层较厚,为地质灾害发育提供了物源。耕种破坏了原有植被,加剧了水土流失,斜坡变形破坏加剧。同时,修建梯田改变了斜坡形态,加速雨水入渗,不利于坡体的稳定性。

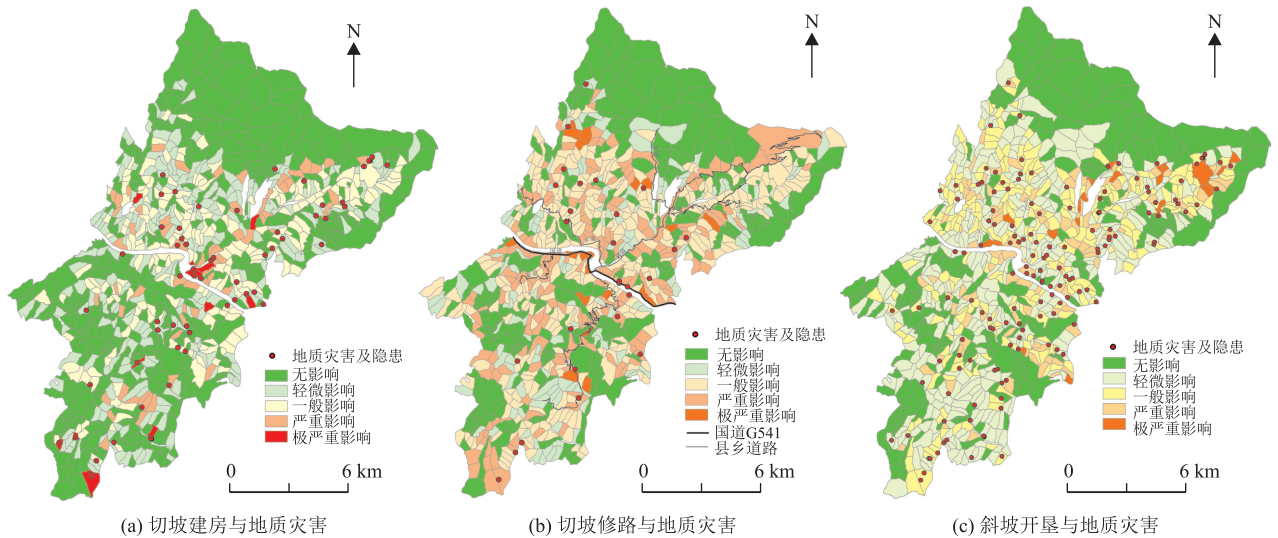


图 8 人类工程活动与地质灾害

#### 4 基于多元逻辑回归孕灾地质环境条件分析

基于定性对研究区孕灾地质条件分析,漩渦镇地质灾害发育受地形(坡面形态、剖面形态、坡度)、地质构造、工程地质岩组(岩体坚硬程度、岩体完整程度、覆盖层厚度)、地表水和人类工程活动等的因素影响较大,受地貌、地形(坡向、坡高)、斜坡结构、地下水影响较小。

采用多元逻辑回归模型分析,因变量是斜坡单元内是否发生地质灾害,因子是斜坡坡面形态、剖面形态、坡度、岩体坚硬程度、岩体完整程度、覆盖层厚度、地表水、切坡建房和修路、斜坡开垦,通过分析各

因子对地质灾害发生的显著性来确定权重。

相关性验证表明,地质构造和岩体完整程度对地质灾害控制作用具有很高的相关性,地质构造主要影响岩层倾向和岩体完整程度,将地质构造孕灾因子归到岩体完整程度。切坡修路和切坡建房具有相似的孕灾地质环境条件,合并成一类因子进行分析。

回归分析结果表明,选取的 9 项孕灾因子对地质灾害发育有明显控制作用,显著性均 $<0.5$ ,其中切坡、岩体完整程度显著性最低,对研究区地质灾害发育贡献率最高。且经过拟合度验证表明,评价模型验证显著性 $<0.05$ ,各项因子的权重较为合理(表 1、表 2)。

表 1 多元逻辑回归分析各因子显著性及权重

指标	模型拟合条件		自由度	显著性	因子权重
	简化模型的-2 对数似然	似然比检验 卡方			
坡面形态	527.374	4.011	3	0.260	0.05
坡度	526.031	2.668	4	0.105	0.15
剖面形态	527.208	3.846	4	0.427	0.05
岩体坚硬程度	523.637	0.275	3	0.465	0.05
岩体完整程度	531.684	8.321	3	0.040	0.20
覆盖层厚度	576.940	53.578	4	0.057	0.15
地表水	530.981	7.618	4	0.107	0.10
切坡	534.227	10.864	4	0.028	0.20
耕种程度	528.132	4.770	4	0.312	0.05

注:显著性越小说明该因子贡献率越高,显著性 $<0.5$ 一般认为具有相关性。

表 2 多元逻辑回归模型验证

似然比检验			拟合优度			
卡方	自由度	显著性	卡方	自由度	显著性	
222.521	40	0.000	皮尔逊	929.054	845	0.023
			偏差	518.732	845	1.000

## 5 结论

基于大比例尺、精细化汉阴县漩渦镇地质灾害调查,以斜坡为孕灾单元,定性分析孕灾地质环境条件,定量评价关键孕灾因子权重,可以得出以下结论。

(1) 定性分析表明,研究区地形(斜坡坡面形态、剖面形态、坡度)、地质构造、工程地质岩组(岩层强度、岩体完整程度、覆盖层厚度)、地表水、人类工程活动(切坡建房、切坡修路、斜坡开垦)等因子对地质灾害发育控制作用明显。

(2) 采用多元逻辑回归分析,相关性检验表明地质构造与岩体完整程度、切坡建房与切坡修路相关性较高。显著性分析表明地形(坡面形态、剖面形态、坡度)、工程地质岩组(岩层强度、岩体完整程度、覆盖层厚度)、地表水、人类工程活动(切坡、斜坡开垦)等 9 项因子为关键因子。其中切坡、岩体完整程度对研究区地质灾害发育贡献率最大,权重最高,坡度、覆盖层厚度、地表水次之,斜坡坡面形态、剖面形态、岩体坚硬程度、斜坡开垦因子权重最低。

## 参考文献

- [1] 谷天峰,王家鼎,付新平. 基于斜坡单元的区域斜坡稳定性评价方法[J]. 地理科学, 2013, 33(11): 1400-1405.
- [2] 杨柳牟,鑫亮,李晨,等. 延安市宝塔区地质灾害风险评价[J]. 山地学报, 2020, 38(5): 679-690.
- [3] 陶伟,孙岳. 基于 GIS 滑坡地质灾害易发性评价方法综述[J]. 世界有色金属, 2020, 11(21): 157-159.
- [4] 陈晓利,冉洪流,祁生文. 1976 年龙陵地震诱发滑坡的影响因子敏感性分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2009, 45(1): 104-110.
- [5] 陈绪钰,李明辉,王德伟,等. 基于 GIS 和信息量法的四川峨眉山市地质灾害易发性定量评价[J]. 沉积与特提斯地质, 2019, 39(4): 110-111.
- [6] 吴森,李虎杰,陈国辉,等. 基于贡献率权重法的区域滑坡影响因子敏感性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(1): 26-31.
- [7] 杨顺,常晁瑜,李孝波,等. 基于 Logistic 回归模型的黄土斜坡地震稳定性快速评判方法[J]. 地震工程学报, 2020, 42(2): 512-516.
- [8] 屠水云,张钟远,付弘流,等. 基于 CF 与 CF-LR 模型的地质灾害易发性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(2): 96-104.
- [9] 樊芷吟,苟晓峰,秦明月,等. 基于信息量模型与 Logistic 回归模型耦合的地质灾害易发性评价[J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 340-347.
- [10] 陶舒,胡德勇,赵文吉,等. 基于信息量与逻辑回归模型的次生滑坡灾害敏感性评价:以汶川县北部为例[J]. 地理研究, 2010, 29(9): 1594-1605.
- [11] 谭龙,陈冠,王思源,等. 逻辑回归与支持向量机模型在滑坡敏感性评价中的应用[J]. 工程地质学报, 2014, 22(1): 56-63.
- [12] 颜阁,梁收运,赵红亮. 基于 GIS 的斜坡单元划分方法改进与实现[J]. 地理科学, 2017, 37(11): 1764-1770.

作者简介: 周修波(1993—),男,工程师,中国地质大学(北京)毕业,主要从事地质灾害防治工作。E-mail: 1123773422@qq.com